

レーザマイクロフォンによる音波検出に関する研究

Study on detection of sound wave by laser microphone

神田 明典[†] , 津田 紀生^{††} , 山田 諄^{††}

Akinori Kanda , Norio Tsuda , Jun Yamada

Abstract Since the vibrating film is used for a current microphone, the detectable frequency is restricted. Recently, the influence on the human body by the sound wave of low frequency or high frequency from various apparatuses or equipments has become a problem. It is necessary to detect the sound wave of such frequency. A new type of microphone by using self-coupling effect of semiconductor laser has been studied. It is named the laser microphone. This microphone consists of laser and a light reflector, and it is not necessary to post-process a signal. An acoustic field is not disturbed by the microphone. The laser microphone can detect a sound with frequency from 10 Hz to 20 kHz. The laser microphone is more sensitive than the condenser microphone in long distance from sound source, and is detectable a sound with lower frequency than condenser microphone. Moreover, if there is the sound source with some sound pressure, sound with the lower frequency below 10 Hz may be detectable.

1. はじめに

現在、音波の検出をする方法としてマイクロフォンを用いて検出を行っている。その種類としてはコンデンサマイクとダイナミックマイクの 2 種類がある。

コンデンサマイクは互いに平行な 2 枚の電極板があり、一方を振動膜とし、音の振動によって振動膜が振動する事により電極間の静電容量が変化する。その電極間に直流電圧をかけ、静電容量の変化を電圧の変化に変換し、電気信号として取り出して音波検出している。コンデンサマイクの長所は、構造が簡単で小型で安価であり指向性を持たない。又、平坦な周波数特性を持っている。短所としては振動膜が μm とかなり薄い為、高音圧、衝撃波に弱く、振動膜が振動しない低周波・高周波の検出が行えない。又、電磁気的な影響を受けやすく、音場を乱す欠点がある。この様な特性を持つ為、コンデンサマイクによる正確な音場分布の測定が行えなかった。

ダイナミック型のマイクでは振動膜に加えコイル、永久磁石が使用されている。音波の振動が振動膜に当たり、

その振動でコイルを動かして発電し、その電流の変化を電気信号に変換するマイクである。長所としては構造が単純で、耐久性（振動、高音圧に強い）があるという事、短所としては電流を作る為ある程度、コイルと振動膜の大きさが必要なので小型化が難しく、コンデンサマイクに比べて検出可能領域（特に高周波数帯域）が集音にくいという特徴が挙げられる。又、指向性を持つ。

どちらも検出可能な周波数域が制限され、長短所によって使い分けられているが、近年では機器、設備などによる可聴周波数域外の低周波や高周波による人体への影響も問題視されており、現在あるマイクでは測定できない低周波、高周波数域の音波の検出も行う必要がある。

低周波音の影響については、建具等をがたつかせる「物的影響」、低周波音が眠りを妨げる「睡眠影響」、低周波音の知覚により圧迫感、振動感や頭痛、吐き気等がもたらされる「心理的・生理的影響」等がある。その発生源については、送風機（送風機を用いる集塵機、乾燥機、空調機冷却塔等）、ディーゼル機関（バス、トラック等）、真空ポンプ、風車、燃焼機械（ボイラー、電気炉等）、ジェットエンジン（ガスタービンを用いる航空機等）、治水施設（ダム、堰堤等）、ガスエンジン、水車、変圧器などが挙げられる。しかし、極低周波を正確に検出す

[†] 愛知工業大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻^{††} 愛知工業大学 工学部 電気学科 電子情報工学専攻

るマイクが無い為、原因究明の妨げとなっている。

そこで、振動膜を使用しない半導体レーザの自己結合効果を利用し、音波を直接検出する方法をレーザマイクロフォンと名付け、装置を試作し、周波数特性の測定を行い、それにより新しい音波検出装置の実現を目指した。

又、レーザマイクロフォンの特徴として、半導体レーザと光を反射させる反射板のみとなり、回路も簡単な定電流回路と I-V 変換回路という構成で、信号の後処理なく測定できる事から装置・構成共に非常に簡略化することができる。

2. 測定原理

2-1. 自己結合効果

単一波長動作をするレーザダイオード (LD) は、コヒーレンスが高い為、可干渉性が非常に強いという特徴を持っている。そのため、レーザ光が対象物に当たって反射板からの戻り光が LD の活性物質内に戻ってくると、出力光と干渉し合い出力光強度が変動する。この戻り光によって生じる光強度変動を戻り光ノイズと呼ぶ。戻り光ノイズによる LD の特性変化は出力光に対する相対的な光量が 10^{-6} 程度と極めて僅かであっても顕著に現れる。これは出力光と戻り光との干渉が共振条件を満たすと、LD の共振器内での増幅作用により、実際の戻り光量以上の出力の増加となる為である。この現象はこれまで各種の応用技術で雑音の原因として大きな障害となっていたが、この現象を自己結合効果として利用し音波検出に応用した。この効果を用いる事により、センサ部が LD とレンズのみの構造となり小型化が可能で、又、僅かな戻り光でも顕著に効果が現れる為、小さい音であっても音波の検出が可能である。

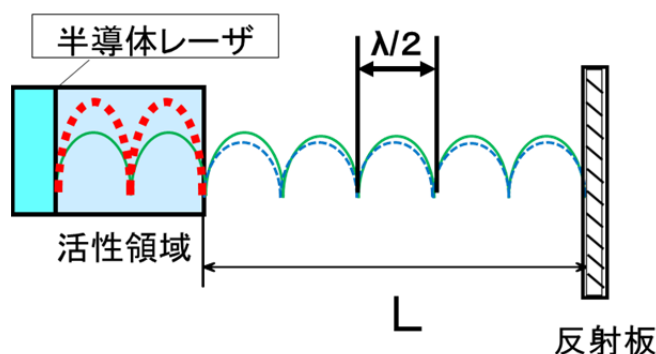


図1 複合共振モデル

本研究の測定に応用している自己結合効果とは図1に示す様に、LD から発振されたレーザ光は平行ビームにし

て反射板に照射する。その戻り光を LD 内部の活性領域内に戻す。この時、LD からの出力光と戻り光が LD 共振器内で干渉し、出力光が僅かに増減する。この現象を自己結合効果と呼ぶ。そして発振波長を λ 、LD から外部反射板までの距離を L とすると共振条件式 (2.1)

$$L = \frac{\lambda}{2} \cdot n \quad (n ; \text{整数}) \quad (2.1)$$

を満たすとき光出力が最も増加する。現在、自己結合効果を利用した振動計¹⁾、距離計²⁾などの研究が行われているが、本研究ではこの自己結合効果を音波検出に応用した。

2-2. 検出原理

本研究では LD から出た光をレンズによって平行ビームにし、レンズと外部共振器の間に音波を当て、音波による空気の密度変化による屈折率の変化を検出する事でレーザ光から音波を検出することに応用した。音というのは疎密波であり、空気密度の高低で構成されている。音によって光路中の空気密度 (= 屈折率) が変化し、戻り光位相が変化する事から音波検出に応用している。ここで光の関係式、および屈折率による波長変化を下に示す。

$$n = \frac{c}{v}, \quad v = f\lambda, \quad \lambda = \frac{1}{f} \frac{c}{n} \quad (2.2)$$

ここで n は屈折率、 c は真空中の光の速さ、 v は物質中の光の速さ、 f は光の周波数である。式 (2.2) から分かる様に屈折率と波長は反比例の関係にあり、屈折率が高くなれば波長が短くなり、屈折率が低ければ波長が長くなる。その関係を図2に示す。

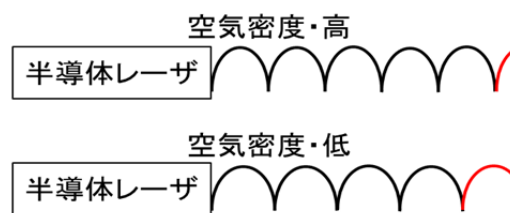


図2 音による波長変化

波長の変化から自己結合効果による光出力の増減が起き、その変化を観測する事で音波検出に応用した。

1atm の空気の真空との屈折率 $n-1=3 \times 10^{-4}$ は1に比べ小さく、普通の会話程度の音圧 $0.1 \text{ Pa} = 10^{-6} \text{ atm}$ における屈折率変化は 3×10^{-10} 程度と小さくなっている。しかし、外部共振器内に立つ定在波の数は $L=1 \text{ m}$ の時 3×10^6 と非常に多く、全体の位相変化は $3 \times 10^{-10} \times 3 \times 10^6 \approx 10^{-3}$ と自己結

合効果を用いて十分検出可能となる。

そして、低周波数から、高周波まで一つの装置で検出を行う事が可能で、音場と非接触で検出している為に音場を乱す事なく音波検出を行う事が出来る。さらに、疎密波から検出を行っている為、水中音波検出、プラズマ密度計測など、様々な応用にも広がる。

3. 測定装置

3-1. 測定装置概要

測定装置概略図を図3に示す。本研究において試作した装置は、光学系と投光回路、受光回路から構成されている。

光学系はLDと集光レンズから成り、固定と集光距離調節の為に真鍮製のシリンダで構成され一体型となっている。

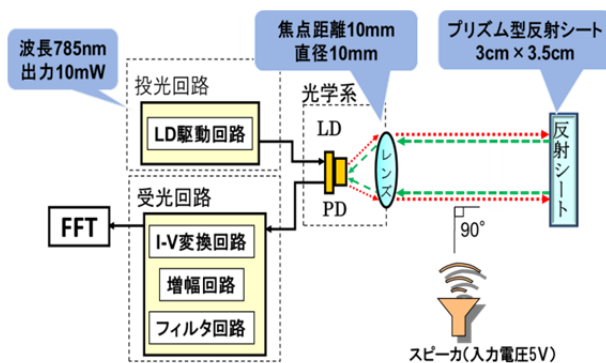


図3 測定装置概略図

投光回路はLD駆動回路のみで構成され、LD駆動回路でレーザ(HITACHI社製 HL7859MG 波長 785nm、出力 10mW)を連続発振させる。レーザ光は集光レンズ(直径 10mm、焦点距離 10mm)により平行ビーム(縦 3mm、横 5mmの楕円形)にされ反射板に照射される。反射板にはプリズム型反射シート(3M社製ダイヤモンド・グレード DG³4090 シリーズ)を使用した。反射シートに当たり反射した光は、戻り光の一部を同じレンズで集光し、LD内で自己結合効果を起こし、その出力の変化をLD内のフォトダイオード(PD)で受光する。得られた受信信号をI-V変換回路、増幅回路、フィルタ回路に通し、その出力をFFTで測定した。FFTは外部雑音の影響を避ける為を使用した。

反射板にプリズム型反射シートを使用する事によって光軸調整を容易にすると共に、戻り光量を多くして自己結合効果をより強くした。反射シートはマグネットベースに接着剤で接着し、光学ステージに磁石で固定した。

そして、レーザ光に対して垂直にスピーカ(Pioneer社製、2way サテライトスピーカ carrozzeria[TS-STH1000]、再生周波数帯域 73[Hz]~4[kHz])を置き、ビームの長径から音波を当て、測定を行った。

又、本研究では可聴周波数帯域と低周波数帯域で、受光回路を変えて測定を行った。I-V変換回路のカップリングコンデンサを 0.1[uF]から 22[uF]、オペアンプを LF356 から 1/fノイズの低い OP37 に変え、LPFも 20[kHz]から 200[Hz]に変えた。スピーカも再生周波数帯域が 2.0[Hz]から出力できるヘッドホン(ソニー社製ステレオヘッドホン[MDR-XB1000]、再生周波数帯域 2[Hz]~30[kHz])に変えて測定した。

3-2. 光学系

本研究で作製した装置は小型で、構造も簡単であるのが特徴である。光学系ではPD内蔵のLDと集光レンズで構成され、真鍮製のシリンダと一体型となり、その概略図を図4で示す。レンズには光洋社製の直径 10[mm]、焦点距離 10[mm]の両凸レンズを使用した。シリンダはLD側、レンズ側で分かれておりレンズ側はネジ式で稼働できる構造になっている。

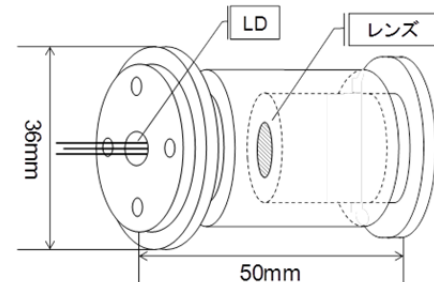


図4 光学系構造図

LDはシリンダの中央にあり、両側から真鍮製の板で挟み込み、板の4隅にネジ穴を開けてネジで固定した。又、LDのレーザ照射方向は空洞にし、円筒型となっている。

レンズ側のシリンダにはレンズが接着してあり、LD側との固定をネジ式とする事でLDとレンズ間の距離を変更する事が可能で、発振させたレーザ光の集光距離を調整でき、これにより平行ビーム調整を簡略化した。

4. 出力波形

本研究で作製したレーザマイクロフォンで測定し、オシロスコープで得られた信号波形を図5に示す。

測定条件を図6に示す。スピーカとレーザ光軸の距離を 15[cm]、LDと反射板距離を 15[cm]、入力電圧 5[V]、入力周波数 3[kHz]とした。図5より、上の波形がレーザ

マイクで得られる電圧波形、下はスピーカの入力信号となっている。レーザマイクの出力波形は元のレーザ光出力をフィルタ回路によって高周波成分を取り除いてあるが、フィルタで取り除けない残留ノイズの為、トレース幅が広がっている。しかし、この 2 つの波形を見て分かる様にスピーカの波形とレーザマイクの波形がほぼ一致している事が分かった。多少のノイズが入り込んでいるものの、レーザ光で音波の検出は可能となっている。又、レーザマイクの出力をスピーカに接続すれば、声をスピーカから直接聞く事が確認できた。

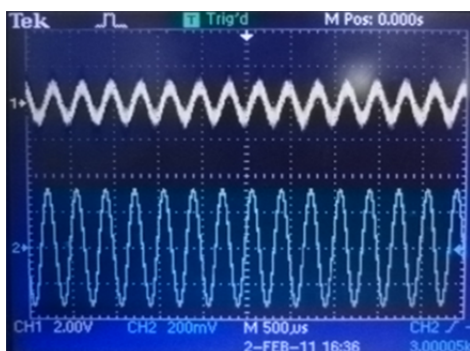


図 5 入、出力波形

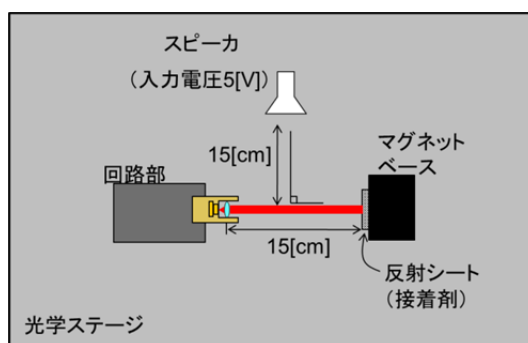


図 6 測定条件

又、低周波数帯域では波形にノイズ成分（周辺機器などから）も多く、出力電圧が安定しない為、出力電圧でなく FFT アナライザーを利用して測定した。

5. 周波数特性結果

5-1. 可聴領域での周波数特性

一般的な部屋(60[dB]以上)での周波数特性の測定を行った。測定条件を図 6 に示す。スピーカ（ソニー社製 2WAY スピーカ）への入力電圧を 5[V]、レーザ光軸とスピーカの距離を 15[cm]、LD と反射板距離 15[cm]一定とした。そして、周波数を 10[Hz]から 100[kHz]まで変化さ

せて測定を行った。騒音計、コンデンサマイク（周波数応答 50[Hz]～18[kHz]、感度 65[dB]～3[dB]、無指向性）、レーザマイクの 3 種で測定し、結果をそれぞれ図 7 に示す。騒音計はオシロスコープで測定し、入力電圧からの利得を示した。また、騒音計は小野計器株式会社製の普通騒音計 LA-1210(測定周波数範囲は 20[Hz]～8000[kHz])を使用し、騒音計の特性はスピーカの特性になると考えられる。

700～800[Hz]帯で大きく減衰しているが、これはスピーカが 2way 方式で 770Hz において低音域と高音域の切り替えを行っている為、測定した 3 種とも減少している。測定の結果利得が上下に変動しており、ばらつきがみられるが、これは測定した部屋の雑音がすでに 60dB あるということと、受信回路の S/N によるものと考えられる。レーザマイクとコンデンサマイクを比較すると、コンデンサマイクの方が高い周波数で早く減衰している事も分かった。

しかし、スピーカの音圧が小さくなってしまう 100[Hz]以下の低周波や 20[kHz]以上の高周波では周囲のノイズに埋もれてしまい、測定する事が出来なかった。100[Hz]以下で測定ができていないのは、受信回路のカップリングコンデンサやオペアンプの $1/f$ ノイズによるものであると考えられる。

この測定結果から低周波数帯域について改善し、測定した結果を以下の 5-2 に示す。

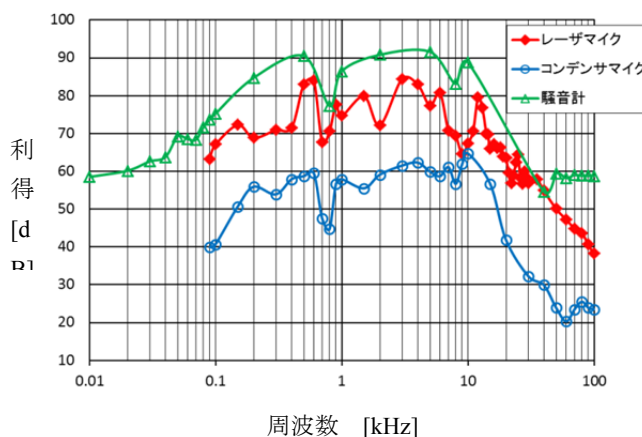


図 7 周波数特性（可聴周波数帯域）

5-2. 低周波数帯域における周波数特性

I-V 変換回路のカップリングコンデンサを 0.1[μF]から 22[μF]、オペアンプを LF356 から $1/f$ ノイズの低い OP37 に変え、LPF も 20[kHz]から 200[Hz]に変えた。スピーカも再生周波数帯域が 2.0[Hz]から出力できるヘッドホンに変えて測定した。又、騒音計はリオン株式会社製の

低周波音レベル計 NA-18A を使用した。測定周波数範囲は 1[Hz]～500[Hz]となっている。ヘッドホンへの入力電圧を 5[V]、レーザ光軸とヘッドホンの距離を 10[cm]、LD と反射板距離 15[cm]一定とし、周波数を 10～1000[Hz]まで変化させて測定した。その測定値(FFT)より利得を求め、「測定値／音圧」の周波数特性を図 8 に示す。

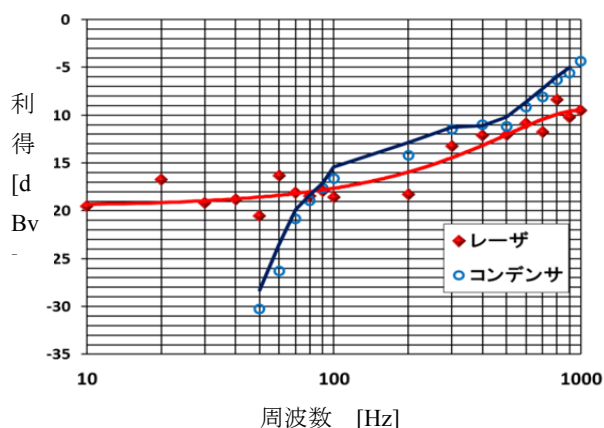


図 8 周波数特性

コンデンサマイクでは 100Hz から急激に減衰し始め、40Hz までしか測定出来ないのに対し、レーザマイクでは 10Hz まで測定でき、レーザマイクの方がコンデンサマイクよりも低周波数特性が良い事が分かった。又、一定以上の音圧の音源があれば 10[Hz]以下の低周波でも、レーザマイクならば測定できる可能性がある事が分かった。

6. スピーカからマイク（レーザ光軸）までの距離を変化させた距離特性

スピーカからマイク（レーザ光軸）までの距離を 5～100[cm]まで変化させて測定を行った。測定条件は Pioneer 2way スピーカで入力電圧 5[V]、入力周波数が 3[kHz]とした。結果を図 9 に示す。

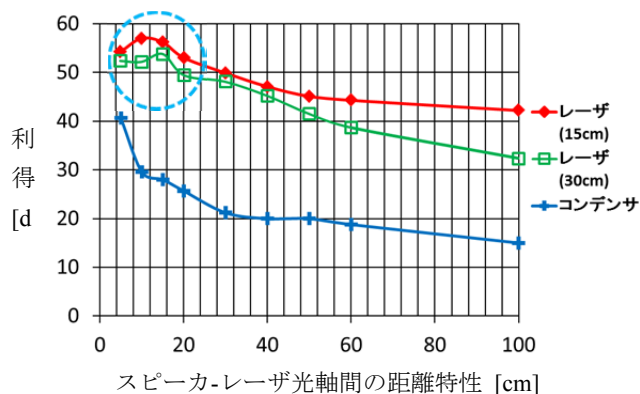


図 9 レーザマイクロフォンの距離特性
(入力周波数[3kHz])

コンデンサマイクでは利得が距離に対して反比例で減少していくのに対し、レーザマイクは破線の円で分かる様にピークが観測された。反射シートまでの距離の約半分の距離でピークが現れる事が分かった。

音というのは音源から広がり、遠くなれば音圧も下がる。検出には音の音圧と、光路上の屈折率変化が起きている領域との積で決まる為、距離が近いと音圧は高いが、屈折率変化が起きる領域は狭くなる。しかし、距離が遠くなる事によって音波はレーザ光路上全体に音波が当たる為、ピークが現れる。これは、レーザマイクロフォンの大きな特徴と言える。

又、レーザマイクの方が距離に対しての利得の減少幅も小さい事が分かったので、離れた所ではコンデンサマイクよりも感度が良いと考えられる。この様な結果は他の周波数でも観測できた。低周波域での結果を次に示す。

低周波数帯域においてのヘッドホンからマイク（レーザ光軸）までの距離を 5～20[cm]まで変化させ、入力周波数を 40[Hz]として測定した結果を図 10 に示す。

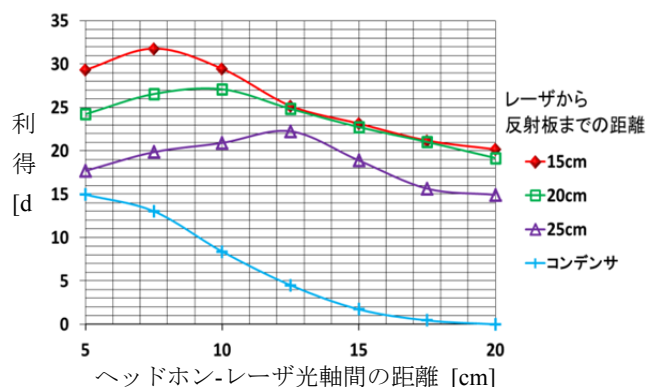


図 10 レーザマイクロフォンの距離特性
(入力周波数[40Hz])

ヘッドホンによる音圧が小さい為、距離を 5～20[cm]までしか測定できなかったが、可聴周波数帯域と同様にコンデンサマイクでは距離に対して反比例で減少していくのに対し、レーザマイクでは反射シートまでの距離の約半分の距離でピークが現れるのが確認できた。他の低周波数帯域 (20、80、100[Hz]) でも同様の結果となった。60[Hz]では、電源電圧などの周辺機器によるノイズの影響により安定した値が取れなかった。

又、この測定ではレーザ光軸に対して直角に行ったもので、スピーカの音波を直接反射板に当てていない。しかし、距離を保ち、スピーカの向き（角度）をシリンダ側や反射板側に向けても得られる信号は大きくなかった事が確認出来ている。これにより、音で装置が振動してしまっている可能性が低い事を示している。

8. スピーカ角度依存特性

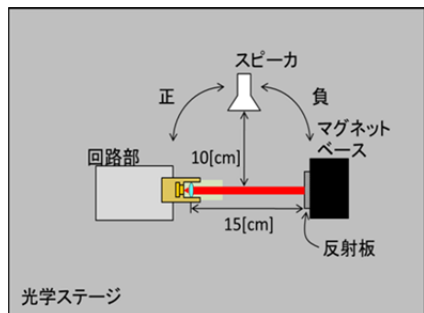


図 11 スピーカ角度特性の測定条件

図 11 の様に周波数 1[kHz]、入力電圧 5[V]、LD と反射板の距離 15[cm]一定とし、レーザ光軸とスピーカの距離を 10[cm]に保ち、レーザ光

の真ん中を中心、スピーカの角度を変化させて角度依存特性の測定を行った。結果を図 12 に示す。角度軸は、レーザ光路上とスピーカが直角の関係にある時を $0[^\circ]$ とし、シリンダ側からレーザ光方向に向けた場合を正の値、反射板側からレーザに向けた場合を負の値としてある。

スピーカを直角に置いた場合が最も感度が良く、スピーカをシリンダ側、もしくは反射板側に移動させると感度が悪くなる結果となった。

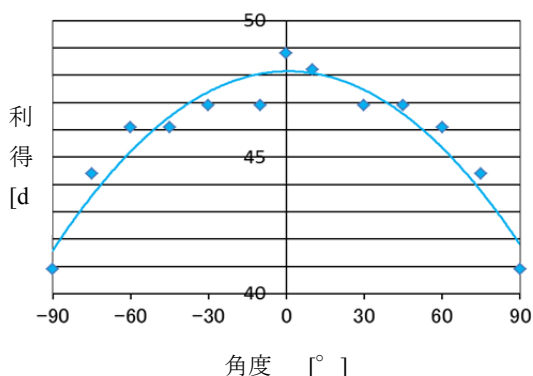


図 12 スピーカ角度特性

音波は疎密波であり、空気密度の高低で構成される。そして音源から扇状に出力されて波の様に広がっていく。スピーカをレーザ光軸に対して直角に置く事で、レーザにはほぼ同時に全体に音波が当たる。その為、レーザ光路上では屈折率変化（位相変化）が同時に全体で起こる。しかし、スピーカの角度を変化させ、横から当てる事によってレーザ光路上で音波が当たる時間に違いが生まれる。それによりレーザ光路上の場所によって音の密の部分、疎の部分が存在する為、レーザ光路上全体の位相変化を見ると、打ち消し合ってしまう電圧値が減少した。

又、低周波用のレーザマイクでヘッドホンの入力周波数 40[Hz]として測定を行った結果、可聴周波帯域と同様に、ヘッドホンに直角に置いた場合が最も感度が良く、

ヘッドホンをシリンダ側、反射板側に移動させると感度が悪くなる結果となった。

この結果は、本研究で作製したレーザマイクの特徴であり、レーザで音波検出が行われている事が分かった。

9. まとめ

本研究で作製した装置は、半導体レーザとレンズ、反射板のみで構成する事が出来、回路も LD 駆動回路、I-V 変換回路、増幅回路、フィルタ回路で信号の後処理する事なく構成する事ができた。

音の検出についてはレーザの出力をスピーカに直接繋ぐ事により、検出した音を聞く事が可能な為、音の検出は行えていると断定した。

周波数特性を測定した結果、低周波数帯域ではコンデンサマイクよりもレーザマイクの方が特性が良い事を確認した。又、高周波数帯域では、20[kHz]以上の高い周波数帯域まで測定出来なかったが、スピーカの特性とほぼ同じ周波数特性を確認した。低周波での特性から一定以上の音圧のある音源があればより低い周波数帯域で検出が可能となると考えている。

レーザ光軸とスピーカの距離を変化させて測定した結果、ピークが観測できたが、これは音の音圧と、レーザ光路上の屈折率変化が起きている領域との積で決まる為、少し距離を遠くする事で感度が最も良くなる事が分かった。又、その感度の最も良くなる距離は LD から反射板までの距離の約半分の距離となった。

レーザ光軸とスピーカの距離を一定に保ち、LD から反射板の距離の真ん中を中心、角度を変化させて測定を行った。レーザ光軸に対しスピーカを直角の位置に置いた場合が最も感度が良くなった。レーザ光路上では屈折率変化（位相変化）が同時に全体で起こるからである。

この距離特性と角度依存特性の 2 つの結果は、本研究で作製したレーザマイクロフォンの特徴を良くとらえており、レーザマイクロフォンで音波の検出が行える事が分かった。

参考文献

- 1) 名和靖彦, 津田紀生, 山田諄: 「自己結合効果を用いた微小振動の自動測定」, 電気学会論文誌 C, Vol.129, No.12, pp.2115-2120(2009.12)
- 2) 坂本明紀, 津田紀生, 山田諄: 「面発光レーザを用いた自己結合型距離計の特性」, 電気学会論文誌 C, Vol.126-C, No.12, pp.1454-1459(2006.12)

(受理 平成 24 年 3 月 19 日)